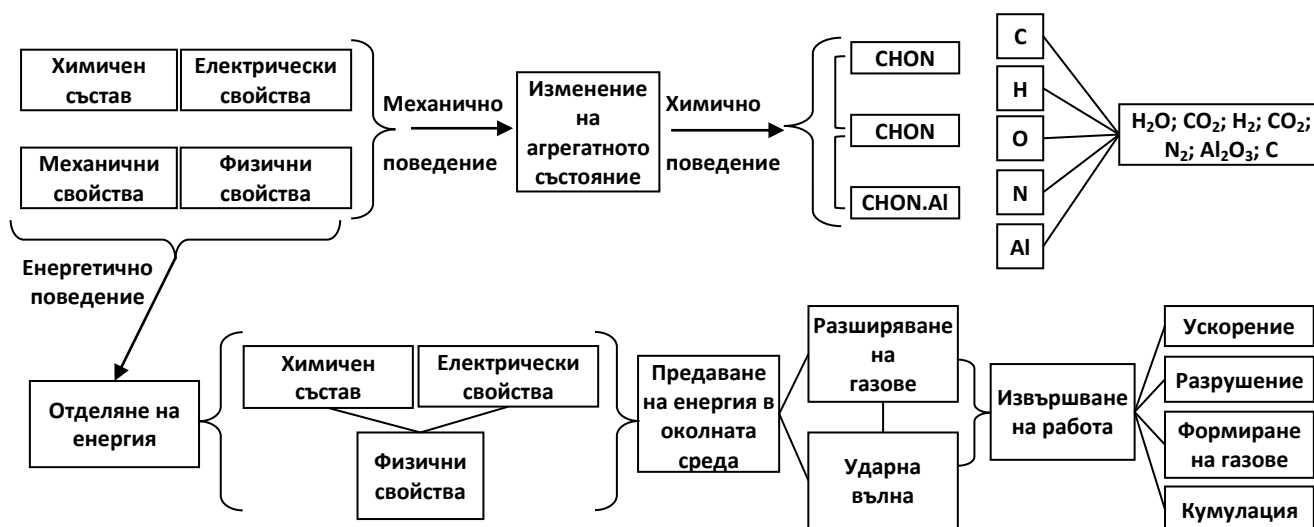


Лекция II

Хидродинамична теория на детонацията

1. Поведение на експлозивите. Режими на взривни превръщания

Цялото многообразие от експлозиви и състави на тяхна основа представлява необикновено широкият ред на енергетичните материали (ЕМ). В последно време терминът ЕМ най-пълно описва тяхната същност, изразяваща се в определено поведение по отношение към различни въздействия и своеобразие на ответните реакции, характерни само за ЕМ. В родната литература най-широко се използва терминът взривни вещества (ВВ), взривни материали (ВМ) и по-рядко – експлозиви. ЕМ са химични съединения, намиращи се при нормални условия в едно от трите агрегатни състояния: твърдо, течно или газообразно (фиг. 2.1).



Фигура 2.1. Поведение на енергетичните материали.

В този смисъл, а също в съвкупността на техните физични, термофизични, механични, електрически свойства, ЕМ не се различават качествено от другите инертни материали и в много случаи могат да изпълняват ролята на конструкционни материали, проявявайки „механично поведение”. Но терминът ЕМ съдържа изключителен смисъл: ЕМ притежават запас от потенциална химична енергия, която може да бъде освободена, а след това и реализирана само в определени условия. Същността на тези условия представлява целенасоченото калибровано въздействие върху ЕМ, осигуряващо необходимия режим на отделяне на енергия.

За ЕМ режимът на отделяне на енергия определя енергетичното поведение на системата, което се съпровожда задължително от механично поведение, и най-вече от изменение на агрегатното състояние на системата. Характерно за изменението на агрегатното състояние на системата е, че веществото от твърдо, течно или газообразно състояние преминава задължително в газообразно състояние. В много от случаите не се изключва присъствието на кондензирана фаза, парообразни и дори твърди съставки.

Газообразното състояние в зависимост от режима на отделяне на енергия и динамиката на фазово превръщане се нарича продукти на горене (ПГ), продукти на детонация (ПД) или продукти на взрива (ПВ), когато не е точно определен режимът на ВП. В най-общия случай ПВ поради относително високата енергоемкост на ЕМ и съответната и плътност на отделяне на енергия (до $17 \cdot 10^3 \text{ kJ/m}^3$), а при много случаи изключително висока мощност на енергоотделяне (10^{14} W/m^2 фронт), притежават запас

от вътрешна и кинетична енергия, която в последствие, а в много случаи и в процеса на отделяне на енергия, се изразходва за извършване на работа. Преминаването от изходно състояние в крайно е сложен процес като проява и е многостепенен по отношение на метастабилните състояния, през които преминава системата. Този преход от изходното (първоначално) състояние към крайното представлява същността на режима на ВП.

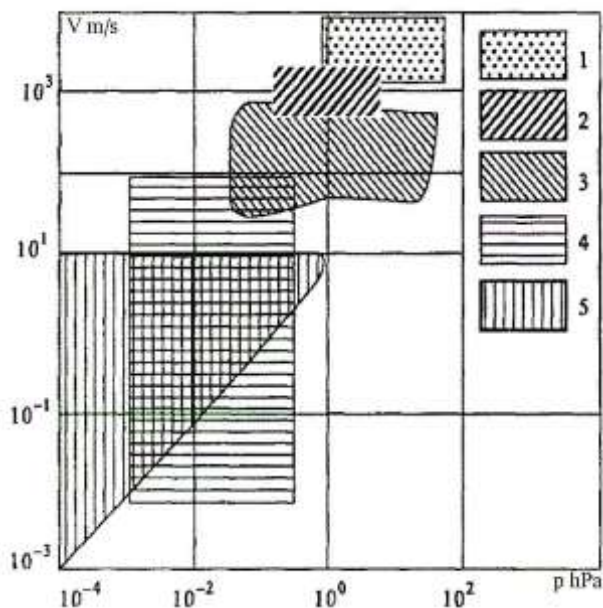
Външното въздействие, предизвикващо отделяне на потенциалната енергия, се нарича инициране. Ако не разглеждаме режимите на ВП, то крайните ПВ проявяват свойственото за всяко вещество механично поведение. Механичното поведение на ПВ се характеризира с различно от изходното агрегатно състояние на ЕМ и енергосъдържание за сметка на отделената енергия. Физическото изражение на поведението на системата, а именно нейните физико-механични, електрически и оптични свойства, които могат да бъдат достигнати само чрез преминаване през режим на ВП, се оказват в много случаи изключителни. За постигане на практически цели в днешни дни в голяма степен се използват именно енергетичните качества на ЕМ, т.е. качествата на режимите и качествата на техните продукти. В по-малка степен се използват ефектите, съпътстващи различните режими на ВП: механични, оптични, електромагнитни, топлинни, свойства на ПВ и свързаните с тях ефекти в околната среда.

Режимите на взривните превръщания (РВП) е по-пълно понятие, отколкото видовете взривни превръщания (ВВП). Режимът на ВП представлява съвкупността от природнозаложен, физичнообусловени и взаимосвързани процеси, целенасочено реализиращи се в енергетичния материал. Различните режими на ВП не могат да се разглеждат отделно от условията на инициране и пространствените ограничения, в които те се реализират. Общото при всички режими в кондензираните системи е отделянето на енергия и фазовият преход. Но механизмът на преход, определящите фактори, пространствената и времевата газо-динамична картина на протичане съществено се различават. Основните режими на ВП са следните:

- нормално /послойно/ горене (НГ) – горене, разпространяващо се послойно със скорост с постоянен профил на температура и концентрация;
- конвективно горене (КГ) – горене на твърдите енергетични материали, притежаващи газо-динамична порестост. Процесът се поддържа от струите на изгорялото вещество. Конвективното горене възниква при достигане до налягане, при което нормалното горене прекъсва, $p_{кр}$;
- нискоскоростна детонация (НСД) – вълнови процес с малка част на разлагане непосредствено след фронта на вълната на притискане;
- нормална детонация (НД) – свръхзвуков стационарен комплекс, състоящ се от ударна вълна и химична реакция зад нея (фиг. 2.2).

Режимите на ВП се различават по предаването на енергия в направление на разпространението и механизма на инициране на химичната реакция във фронта на процеса. Практическо значение имат предимно два пределни по своята същност процеса: послойно (нормално) горене и нормална (стационарна) детонация. Прието е всеки процес по отношение на друг процес с по-големи параметри да се нарича процес от „нисък“ порядък и обратно – „висок“ порядък по отношение на процес с по-малки параметри. Най-естествено се реализират стационарните режими НГ и НД. За осъществяване на КГ и НСД са необходими специални условия, диапазонът на които е сравнително тесен. Посочените процеси имат склонност за преминаване в режим от по-висок порядък или към затихване, а поддържането на КГ или НСД на стационарно ниво изискват специални условия. Понякога съвкупността от възможни процеси, заемащи параметри в областта между НГ и НД, се наричат детонационно-подобни взривове (порядко – непълни взривове), като за тях са характерни високо ниво на параметрите,

самоподдържащо се разпространение, отделяне на енергия и силно отделяне на топлина. Както беше споменато, по ниво на параметрите детонационно-подобните взривове заемат междинно място, частично покриващи диапазона на параметрите, характерни за горенето и детонацията (фиг. 2.2).



Фигура 2.2. Ориентировъчни диапазони на съществуване на режимите: 1 – детонация; 2 – НСД; 3 – детонационно-подобен взрив; 4 – конвективно горене; 5 – послойно (нормално) горене; p – налягане, kPa; V – скорост на фронта, m/s.

И така, по нарастване на мощността и нивото на параметрите режимите се намират в следната последователност: НГ – КГ – НСД – НД. Дадената последователност е своеобразен природен последователен ред на режимите на взривни превръщания, НГ и НД са крайни процеси в този ред, а КГ и НСД – междинни. Тази последователност има следните особености:

1. при определени условия един режим може да преминава в друг в постъпателно направление от процес с нискоскоростни параметри към процес с по-високи параметри;
2. възможно е иницирането на всеки от споменатите режими, който може да премине в следващия;
3. обратният преход НД – НСД – КГ – НГ се изключва;
4. колкото по-висок е порядъкът на процеса, толкова по-големи са параметрите на процеса на ВП: налягане и скорост и толкова по-кратко е времето за неговото протичане.

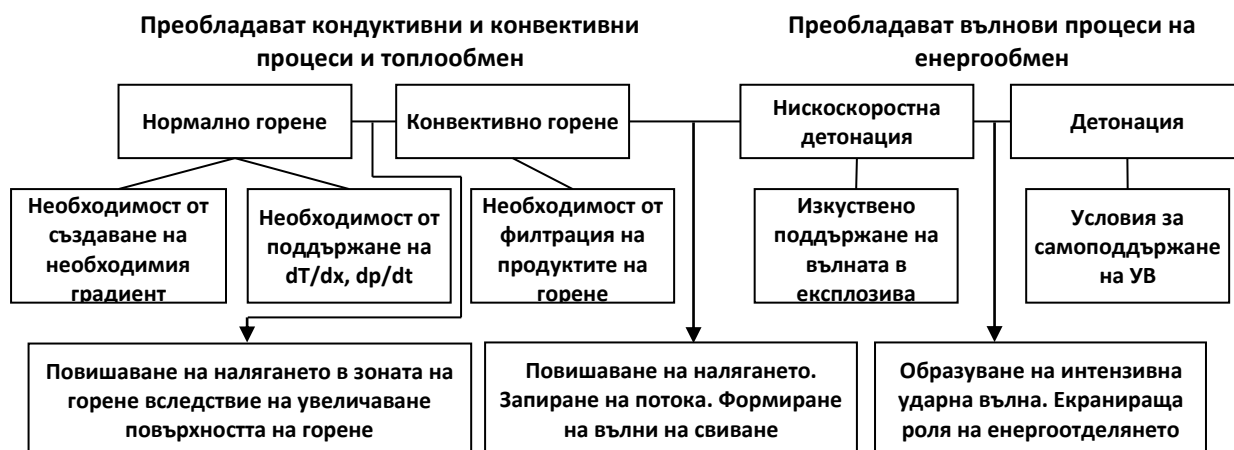
Нормално горене – това е механизъм на предаване на енергия. Разпространението на процеса се определя от молекулната топлопроводност, вълнови ефекти напълно отсъстват, външните условия позволяват сигурно управление на процеса.

Конвективно горене – процесът се поддържа от филтрацията на горящите ПГ от зоната на горене в дълбочина към нереагиралото вещество, ролята на вълновите процеси е съществена само в зоната на горене, ролята на външните условия в управлението на параметрите на режима е ограничена.

Нискоскоростна детонация се възбужда и поддържа от слаби вълни на натиск, генериращи реакция в локални области (огнища), физико-механичната структура на заряда е определящ фактор, съществуването на обвивка способства, а в много случаи определя възможността за разпространение на процеса.

Нормална детонация протича при съвместно енергоотделяне за сметка и на локално, и на хомогенно нагряване зад фронта на силна ударна вълна.

Ще споменем няколко физични аспекта, определящи разпространението на един или друг режим и последователния преход на един режим в друг. При нормално горене налягането $p_{НГ}$ е налягането в околния обем. Когато налягането в околния обем превиши $p_{НГ}$, послойното горене се прекъсва и процесът може да премине на нивото на следващия режим. При конвективно горене $p_{КГ}$ е налягане във фронта на възпламеняване, а при детонация с ниска скорост $p_{НСД}$ – налягане във фронта на вълната на свиване. При нормална детонация $p_{НД}$ е налягане във фронта на ударната вълна. Това е илюстрирано на фигура 2.3.



Фигура 2.3. Схема на трансформация на режимите.

Детонацията се явява своеобразна бариера, която по скорост е около 10 km/s. Интересно е дали съществуват режими, които по своите параметри, се намират между детонацията и термоядрените процеси? На основание на съществуващия опит е логично отричането на тяхното съществуване.

В основата на тези разсъждения лежи известният физичен факт, че ако движещата се материална система се използва за предаване на енергия, то този процес има „енергетична бариера”, която се достига, когато скоростта на предаване на енергия се приближава към критична стойност. Звуковата бариера във въздуха се достига, когато скоростта на средата превишава постъпателните скорости на молекулите O_2 и N_2 . „Топлинната бариера” се достига, ако скоростта на средата превиши вибрационните скорости на молекулите O_2 и N_2 , а „детонационната бариера” – при превишаване нивото на вибрации на молекулните връзки във взривното вещество (връзките $C-H$; $O-H$; $N-H$). В подкрепа на съществуването на „детонационна бариера” говори фактът, че детонационният фронт, движещ се със скорост 8-9 km/s, преминава между атомните разстояния за 10^{-13} s. Константата на скоростта на разлагане също е 10^{-13} s. Тъй като няма друга система за предаване на енергия освен вибрационното движение на атомите, то детонацията не може да „разлага” експлозивите при скорост по-голяма от 10 km/s. Даденият подход не е единствен за обяснение на предела на скоростта на детонация на мощните експлозиви. За съставите $C-H-O-N$ е достигнат и енергетичен предел. Днес за системата $C-H-O-N$ не достигат единици проценти от тяхната пределна възможност (дори за системи несъдържащи водород). Затова е избран логичният път за въвеждане на високоенергетични метални добавки, което е променило структурата на течението зад детонационния фронт, т.е. определена част от общата енергия може да се отделя в неизентропната вълна на разтоварване. В резултат работоспособността на системата се е

увеличила, а налягането във фронта на ДВ се е намалило. Това невинаги е изгодно за практически цели, метателната и натоварващата способност на експлозивите са станали по-силно зависими от условията на предаване на взетата енергия от ПД.

Трябва да отбележим, че не е целесъобразно да се разглеждат режимите на ВП абстрактно, без връзка с конкретна практическа задача. Днес не е достатъчно да се посочи границата на практическа целесъобразност на един или друг режим в специално избран за това ЕМ.

За целите на практиката трябва да се знае значително повече и да се оценяват качествата на режима не само по нивото на параметрите, закономерностите на стационарната форма, но и по характера на енергообмен с обкръжаващата среда, възможността за възбуждане на режима, степента на управляемост, влияние на външните условия върху възможността за разпространение на разглеждания режим. Най-често от значение са или пределните енергетични възможности на режима, или екстремните условия, в които той още може да бъде реализиран. В таблица 2.1 са дадени някои основни качества на режимите на ВП, имащи практически смисъл.

Таблица 2.1.

Сравнителни характеристики на режимите на взривни превръщания

| Качество на режимите | | Нормално горене (НГ) | Конвективно горене (КГ) | Нискоскоростна детонация (НДС) | Нормална детонация (НД) |
|--|----------------------------|--|-----------------------------------|-----------------------------------|---|
| Фронтални параметри на режима | скорост, m/s | $10^3 \div 10$ | $10^3 \div 10$ | $10^{-1} \div 10^2$ | $(2 \div 9) \cdot 10^3$ |
| | налягане, Pa | $10^5 \div 10^9$ | $10^5 \div 10^8$ | $10^8 \div 10^9$ | $(1 \div 30) \cdot 10^9$ |
| | мощност, kW/m ² | $10^3 \div 10^5$ | $10^5 \div 10^8$ | $(1 \div 3) \cdot 10^9$ | $10^9 \div 10^{11}$ |
| Склонност на преход към високоскоростни режими | | да | да | да | - |
| Възможност за: | управление | P, P' | P, P', S, ρ_0 | S, обвивка | обвивка |
| | прекъсване | P, P', ϕ | P, P', ρ_0 | обвивка | - |
| Влияние | външни условия | да | да | да | не |
| | геометрични условия | да | да | да | не (при $D_3 < D_{кр}$) |
| Стойност на енергоотделянето на фронта на процеса | | ~1 | ~1 | 0,1÷0,2 | ~1 до плоскост C-J |
| Изменение на агрегатното състояние на системата | | $K_{\phi} \rightarrow \text{газ} (K_{\phi})$ $K_{\phi} \rightarrow (K_{\phi})$ (газ \rightarrow газ) | $K_{\phi} \rightarrow (K_{\phi})$ | $K_{\phi} \rightarrow (K_{\phi})$ | $K_{\phi} \rightarrow \text{газ} (K_{\phi})$ (газ \rightarrow газ) |
| Предаване на енергия при изхвърляне, % от Q_v | открита схема | 0 | до 5 | до 10 | до 35 |
| | закрита схема | 20 | 20 | 30 | до 70 |
| Възможност за използване на външни източници | | да | да | да | да |
| Склонност към формиране на геометрични образувания на фрагментите, кумулация | | не | не | да/не | да |
| Въздействие върху околната среда | | изотропно | вълново | ударно-вълново | ударно-вълново |

където: P е налягане;

$P' = dP/dt$ – изменение на налягането във времето;

S – повърхност на горене;

K_{ϕ} – кондензирана фаза;

ϕ – повърхност.

В съществуващата литература по теория на експлозивите методологически е приет подход, при който различните режими на ВП се обобщават в единното понятие взрив и се дават факторите, позволяващи да се счита един или друг режим на ВП за взрив. Към определящите фактори се отнасят екзотермичност на процеса, висока скорост на процеса, интензивно газоотделяне, способност за саморазпространение. Дадените фактори могат да се разглеждат като основа за разбиране на физичните основи на процеса.

2. Изисквания към експлозивите

Основните европейски изисквания към експлозивите постоянно се повишават и най-важните от тях са следните:

- Всеки експлозив трябва да бъде проектиран, разработен, произведен и доставен по такъв начин, че да представлява минимален риск за безопасността на човешкия живот и здраве и да не вреди на собствеността и на околната среда при нормални, предвидими условия и в частност по отношение на безопасните правила и стандартни практики включително до времето, през което е използван.

- Всеки експлозив трябва да притежава характеристиките, определени от производителя, за да се осигури максимална безопасност и сигурност.

- Всеки експлозив трябва да бъде произведен по такъв начин, че при използване на подходящи технологии да може да бъде взривен по начин, който намалява вредните ефекти за околната среда.

- Експлозивът трябва да бъде толкова нечувствителен (в смисъл безопасен) в продължение на целия цикъл на експлоатация, следователно трябва да бъде нечувствителен или флегматизиран до нужната степен.

- Експлозивът трябва да притежава стабилност, понижена токсичност на състава и неговите продукти на детонация, съвместимост с различните конструкционни материали и компонентите на състава. Максимална ефективност на действие: работоспособност, разрушаващо или метателно действие.

- Експлозивът трябва да има сигурна детонация от съответните средства за инициране.

- Трябва да има възможност за управление на структурните характеристики на заряда (плътност, порестост, закон за разпределение на фракциите на компонентите по размер).

- Експлозивът трябва да има ниска хигроскопичност, електростатичност, нисък вискозитет в течно състояние, умерена скорост на кристализация, добра смесимост на компонентите, малка утайка при кристализация.

- Експлозивът трябва да може да заема необходимата форма. Зарядът от експлозив трябва да съхранява своята геометрична форма независимо от метода на производство в продължение на целия си жизнен цикъл.

- Приемливата себестойност на изходните компоненти е необходимо условие за ефективността на експлозива.

- Всеки експлозив трябва да бъде надеждно маркиран с цел проследяване от производителя до крайния потребител.

Най-важно свойство на експлозивите е тяхната реално допустима чувствителност, позволяваща да се реализират условията за безопасна манипулация и надеждно санкционирано инициране. Съществуващите методи за оценка на чувствителността са твърде условни и не са достатъчно съгласувани по между си.

3. Хидродинамична теория на детонацията

Явлението детонация е било открито в 1881г. от Бертло и независимо от него от Льо Шателие. Оттогава до наши дни изучаването на детонацията е било насочено както към изучаване в теоретичен аспект на механизма на детонацията, така и за решаване на редица практически задачи, свързани с обезопасяването или предотвратяването на взрива на взривни смеси в редица производства.

Детонацията представлява взрив, разпространяващ се с постоянна и максимално възможна за дадения експлозив и условия скорост. Тази скорост, както и при взрива, винаги е по-голяма от скоростта на звука в експлозива. Детонацията не се отличава (като явление) по характер и същност от явлението взрив, тя е само една при това строго определена за конкретните условия стационарна форма на взрива. Скоростта на детонация за всеки експлозив при дадени условия е напълно определена постоянна величина. Това е позволило тя да бъде една от най-важните и най-често използваните взривни характеристики на експлозивите.

В условията на детонация се постига максималният разрушителен ефект на взрива. При взрива в мястото, първоначално заемано от експлозива, рязко се повишава налягането. Това довежда до появата и разпространението на ударна вълна (УВ) в пространството около мястото на взрива. УВ въздейства по определен начин на срещаните по нейния път препятствия (сгради, съоръжения или други конструкции) като оказва върху тях механично натоварване. Познаването на тези ударновълнови въздействия, а също и поведението на материалите, подложени на тях, са изходно начало при проектирането на съоръжения за производство, преработване и съхранение на експлозиви.

В резултат на опитни и теоретични изследвания бе създадена хидродинамичната теория на детонацията, особено точно описваща взрива на газовите смеси. По-късно бе доказано, че тя е приложима и за твърдите и течните експлозиви. С помощта на тази теория могат да се обяснят не само качествените особености на явлението детонация, но и с висока за практиката точност да се определят количествено параметрите на детонационната вълна: скоростта D , налягането P_H , плътността ρ_H , температурата T_H , масовата скорост U_H и енергията E_H .

За определянето на тези параметри могат да се използват следните основни уравнения:

$$E_H - E_0 = \frac{P_H - P_0}{2} \left(\frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_H} \right) + Q_v; \quad (2.1)$$

$$D = \frac{1}{\rho_0} \sqrt{\frac{P_H - P_0}{\frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_H}}}; \quad (2.2)$$

$$V_H = \left(\frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_H} \right) \sqrt{\frac{P_H - P_0}{\frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_H}}}; \quad (2.3)$$

$$\frac{P_H - P_0}{\frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_H}} = \left(- \frac{dP}{d\left(\frac{1}{\rho}\right)} \right) = k \cdot \rho_H \cdot P_H; \quad (2.4)$$

$$P_H = f(\rho_H, T_H); \quad (2.5)$$

Последното уравнение на тази система е така нареченото уравнение на състоянието. С индекс „0“ са означени параметрите на газовата смес, а с индекс „H“ – началните параметри на фронта на детонационната вълна. При условие че се приеме, че детонационната вълна се разпространява в идеална газова среда, то уравнението, описващо нейното състояние, е:

$$P_H = \rho_H R T_H = \rho_H T_H C_v (k - 1), \quad (2.6)$$

а уравнението на изотропата е:

$$P V^k = const, \quad (2.7)$$

където: $V = \frac{1}{\rho}$ е специфичен обем;

$C_v = \left(\frac{dE}{dT}\right)_v$ – специфична топлоемкост при постоянен обем;

$k = \frac{C_p}{C_v}$ – степенен показател;

$C_p = \left(\frac{dE}{dT}\right)_p$ – специфична топлоемкост при постоянно налягане.

В съответствие с (2.6) и (2.7) уравнение (2.1) приема вида:

$$\frac{P_H \frac{1}{\rho_H}}{k - 1} - \frac{P_0 \frac{1}{\rho_0}}{k_0 - 1} = \frac{P_H + P_0}{2} \left(\frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_H} \right) + Q_v, \quad (2.8)$$

където: k_0 и k се отнасят за газовата смес и продуктите на детонацията;

Q_v – специфичната енергия на взривното разлагане.

Ако се приеме, че $k_0 = k$ от (2.4) може да се запише следното съотношение между специфичните обеми, респективно между плътностите:

$$\frac{V_0}{V_H} = \frac{\rho_H}{\rho_0} = \frac{k + 1}{k} - \frac{P_0}{k P_H}, \quad (2.9)$$

а за скоростта на детонация от (2.2) следва, че:

$$D^2 = \frac{1}{\rho_0} [(k + 1)P_H - P_0], \quad (2.10)$$

Заменяйки налягането и плътността при решаване на системата уравнения от (2.1) до (2.5), може да се достигне до следния израз за D :

$$D = \sqrt{\frac{k^2 - 1}{2} Q_v + C_0^2} + \sqrt{\frac{k^2 - 1}{2} Q_v}, \quad (2.11)$$

където $C_0 = \sqrt{\frac{k P_0}{\rho_0}}$ е скоростта на звука в изходната газова смес.

От тук, знаейки D , лесно могат да се определят P_H и ρ_H :

$$\begin{aligned} P_H - P_0 &= \frac{\rho_H D}{k + 1} \left(1 - \frac{C_0^2}{D^2} \right); \\ \frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_H} &= \frac{1}{\rho_0 (k + 1)} \left(1 - \frac{C_0^2}{D^2} \right); \\ V_H &= \frac{D}{k + 1} \left(1 - \frac{C_0^2}{D^2} \right). \end{aligned} \quad (2.12)$$

Използвайки уравнението за състоянието на идеален газ, за началната температура на продуктите на взрива T_H се получава изразът:

$$T_H = \frac{P_H}{R\rho_H} = \frac{(kD^2 + C_0^2)}{k(k+1)RD^2}. \quad (2.13)$$

Посочените изрази показват, че параметрите на взрива на газовата смес се явяват непреки функции на T_H , тъй като k зависи от температурата на фронта на детонационната вълна. В резултат на това окончателното определяне на тези параметри става доста трудоемко.

Формулите, описващи отделните параметри на взрива, значително се опростяват, ако се пренебрегне налягането P_0 . Както са показали изследванията, това е възможно за $P_H \geq 1.10^6$ Pa, което винаги е изпълнено при взрив на газови смеси. Тогава (2.9) добива вида:

$$\frac{\rho_H}{\rho_0} = \frac{k+1}{k}, \quad (2.14)$$

а от (2.8) и (2.14), при условие че $P_0 \ll P_H$ и $E_0 \ll E_H$, се получава:

$$P_H = 2(k-1)\rho_0 Q_v. \quad (2.15)$$

При същите условия за D от (2.2) се получава:

$$D = \sqrt{2(k^2-1)Q_v}. \quad (2.16)$$

От решението на системата (2.12), като се изключи C_0^2 , което е пренебрежимо малко в сравнение с D^2 , т.е. $\frac{C_0^2}{D^2} \approx 0$, за V_H се получава:

$$V_H = \sqrt{\frac{2(k-1)}{k+1}Q_v}; \quad (2.17)$$

$$\rho_0 D = \rho_H(D - V_H); P_H = \rho_0 D V_H;$$

$$E_H - Q = \frac{1}{2}P_H(V_0 - V_H);$$

$$-\left(\frac{dP}{dV}\right)_H = \frac{P_H}{V_0 - V_H}.$$

В уравнения (2.15), (2.16) и (2.17) Q_v се изразява в механични единици за работа:

$$Q_v = 427g Q, \text{ m}^2/\text{s}^2,$$

където g е земното ускорение, Q – топлината на взрива, cal/g.

Формули (2.15) и (2.17) позволяват да се определи натоварването, което ще изпита дадена конструкция при взрив на гориво-въздушни смеси. Макар че тези формули са изведени при допускането за идеална горивна смес, по своята простота и удобство за практически разчети те са за предпочитане пред точното решение, което е много трудоемко. Освен това определените по тези формули натоварвания се отличават в незначителна степен от действителните и са насочени към повишаване на надеждността при работа на конструкциите, подложени на тези натоварвания.

За разлика от газовите взривни смеси в единица обем от кондензираните експлозиви е концентрирано огромно количество химична енергия (до $2,5 \text{ kcal/cm}^3$). Началната им плътност ρ_0 достига до $2,0 \text{ g/cm}^3$, а плътността ρ_H на продуктите на взрива при детонация – до $2,7 \text{ g/cm}^3$. Налягането на ПД (P_H) е приблизително равно на 4.10^5 kg/cm^2 , а температурата T_H достига 4000 K . Самият процес на взривно превръщане на тези експлозиви продължава много кратко време (приблизително 10^{-7} s), което затруднява експерименталното му изучаване.

Видните руски учени Ландау и Станюкович доказаха, че хидродинамичната теория на детонацията, създадена за газови взривни смеси, е в сила и за твърдите експлозиви.

Използвайки законите за запазване на масата, импулса и енергията, условието на Чепман-Жуге и уравнението на състоянието на ПД, могат да се запишат основни зависимости, които свързват параметрите на изходния кондензиран експлозив с параметрите на детонационната вълна:

$$P_H = f(\rho_H, T_H). \quad (2.18)$$

Условието на Чепман-Жуге, освен във вида според четвъртото уравнение на тази система, може да се запише и във вида $D = U_H + C_H$ като с индекс „0“ са означени параметрите на изходния експлозив, а с „H“ – началните параметри на ПД на фронта на детонационната вълна.

В случая на детонация на идеален газ уравнението на състоянието на ПД $P_H = f(\rho_H, T_H)$ и функциите $E_H = f(\rho_H, P_H)$ и $P_H = f(\rho_H)$ са известни и това позволява чрез системата (2.12) да се определят всички параметри на детонационната вълна. Не така стои случаят при взрива на кондензирани експлозиви. За ПД на тези експлозиви, които имат плътност от същия порядък както изходния експлозив и се намират при налягания от 20 до 30 GPa, тези термодинамични функции не могат да се определят по чисто теоретичен път, а е необходимо да се използват експериментални данни. Ето защо определянето на параметрите на детонационната вълна съгласно (2.16) може да се осъществи с помощта на различни приблизителни методи.

Така например, ако се пренебрегне началното налягане P_0 и началната вътрешна енергия E_0 на изходния експлозив, които са действително пренебрежимо малки спрямо P_H и E_H , тогава системата (2.12) може да се запише във вида:

$$\begin{aligned} D^2 &= \frac{V_0^2 P}{V_0 - V}; \\ V^2 &= P(V_0 - V); \\ E(P, V) - Q &= \frac{1}{2} P(V_0 - V); \\ \left(\frac{dP}{dV}\right) &= -\frac{P}{V_0 - V}; \\ E &= E(P, V). \end{aligned} \quad (2.19)$$

Ако се приеме, че ПД се подчиняват на изоентропен закон с показател на изоентропата:

$$k = \left(\frac{dP}{dV}\right) = -\frac{V}{P} \left(\frac{dP}{dV}\right),$$

тогава четвъртото уравнение от системата (2.19) може да се запише във вида:

$$k = \frac{V}{V_0 - V},$$

откъдето следва, че:

$$\frac{V_0}{V} = \frac{\rho}{\rho_0} = \frac{k+1}{k}, \quad (2.20)$$

а второто и третото уравнение могат да определят налягането и скоростта:

$$P = \frac{\rho_0 D^2}{k+1}, \quad (2.21)$$

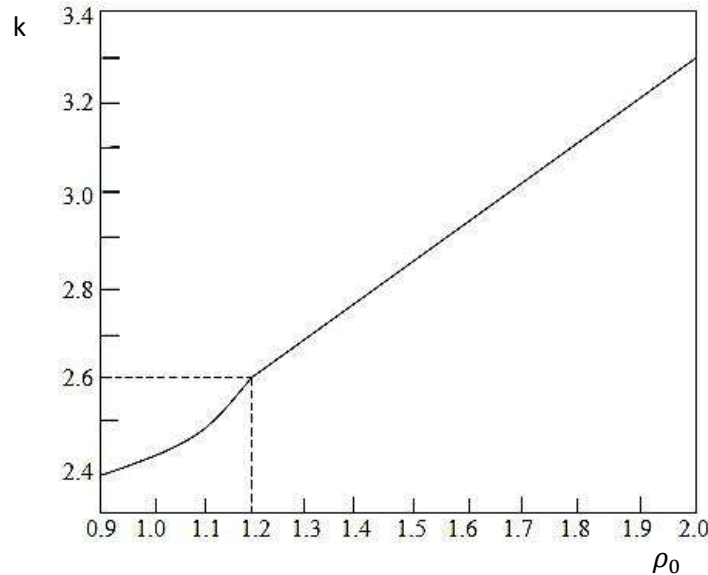
$$V = \frac{D}{k+1}. \quad (2.22)$$

Значението на показателя на изоентропата k за известните експлозиви от типа на хексоген, тен, тетрил, тротил и др. практически се приема за равно на 3. При практически разчети за определянето на k може да се използва уравнението:

$$k = \frac{10,2(1 + 1,3\rho_0)^2}{15,58\rho_0} - 1, \quad (2.23)$$

т.е. k зависи единствено от плътността ρ_0 на експлозива.

На фигура 2.4 е дадена графиката на функцията $k = f(\rho_0)$, изчертана по изчислените данни по формула (2.23).



Фигура 2.4. Графиката на функцията $k = f(\rho_0)$.

Вижда се, че за интервала $1,2 < \rho_0 < 2$, т.е. за практически най-често получаваните плътности при пресоване или друг вид обработка на експлозивите, тази зависимост е почти линейна. Необходимо е да се подчертае, че тази формула достатъчно точно определя k и данните от нея точно съвпадат с други теоретични и експериментални стойности на k .

Като се имат предвид уравнения (2.20), (2.21) и (2.22), а също и уравнението за скоростта на звука в ПД:

$$C_H = \frac{k + 1}{k} D, \quad (2.24)$$

при известна стойност на скоростта D на детонационната вълна могат да се определят началните параметри на тази вълна. Скоростта на детонация за даден експлозив при определена плътност може да се измери непосредствено експериментално. За практически разчет може да се използва и формулата:

$$D^2 = 2(k^2 - 1)Q_v. \quad (2.25)$$

За експлозиви, състоящи се от въглерод, водород и кислород, при начална плътност $\rho_0 > 1,0 \text{ g/cm}^3$ налягането на фронта на детонационната вълна и скоростта на детонация D могат да бъдат изчислени с помощта на полуемпиричните формули:

$$\begin{aligned} P &= F\varphi\rho_0^2, \text{ kbar}; \\ D &= A(1 + B\rho_0)\sqrt{\varphi}, \text{ km/s}; \\ \varphi &= N\sqrt{M_{cp}\cdot Q}, \end{aligned} \quad (2.26)$$

където за различни експлозиви от тази група е прието да се счита, че коефициентите F , A и B имат следните стойности: $F = 15,58$; $A = 1,01$ и $B = 1,3$, а ρ_0 се измерва в g/cm^3 .

За определянето на броя на молекулите на ПД от един грам експлозив N , средното молекулно тегло на ПД M_{cp} , g/mol , и топлината на взрива Q , cal/g , е необходимо да се

зният уравнението на химичната реакция на взривното превръщане на веществото и топлината на образуване на експлозива и ПД.

Нека експлозив с формула $C_aH_bO_cN_d$, където a , b , c и d са съответно броят на атомите въглерод, водород, кислород и азот в молекулата на експлозива. При детонационното превръщане водородът практически напълно се окислява до вода. Що се отнася до въглерода в зависимост от съотношението ρ_0/ρ той или напълно се превръща във въглероден диоксид или се разпределя между въглероден диоксид и въглероден монооксид. Затова може да се говори за две идеализирани схеми на разпадане на молекулите: $H_2O - CO_2$ и $H_2O - CO - CO_2$.

Схемата $H_2O - CO_2$ предполага, че реакцията се извършва по уравнението:

$$C_aH_bO_cN_d = \frac{d}{2}N + \frac{b}{2}H_2O + \left(\frac{c}{2} - \frac{b}{4}\right)CO_2 + \left(a + \frac{b}{4} - \frac{c}{2}\right)C, \quad (2.27)$$

което е в съответствие с принципа на Бертло за максимално топлоотделяне при взривното превръщане на експлозива.

Тогава N и M_{cp} могат да се определят от съотношенията:

$$N = \frac{b + 2c + 2d}{48a + 4b + 64c + 56d}; \quad (2.28)$$

$$M_{cp} = \frac{88c + 56d - 8b}{b + 2c + 2d}. \quad (2.29)$$

Ако разпадането на молекулите се извършва по втората схема ($H_2O - CO - CO_2$) тогава значението на N може да се изчисли по следния начин:

ако $\left(a + \frac{b}{2}\right) \leq c$:

$$N = \frac{2a + b + d}{24a + 2b + 32c + 28d}; \quad (2.29a)$$

ако $\frac{b}{2} \leq c < \left(a + \frac{b}{2}\right)$:

$$N = \frac{2c + d}{24a + 2b + 32c + 28d}. \quad (2.29b)$$

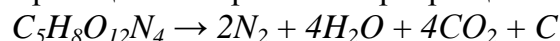
Топлината на взривното превръщане на експлозива в съответствие с формули от (2.27) до (2.29) се изчислява по уравнението:

$$Q = \frac{28,9b + 47,0\left(c - \frac{b}{2}\right) + H_{fT_0}}{12a + b + 16c + 14d}, \quad (2.30)$$

където H_{fT_0} е енталпията на образуване на експлозива при стационарни условия, cal/g.

Пример. Да се намери налягането и скоростта на детонация на ТЕН.

Съгласно химичната реакция на взривното превръщане на ТЕН:



Сумата от моловете Σn на газообразните продукти на детонацията е равна на 10. Молекулното тегло на ТЕН е $M = 316$. Отгук $N = 10/316$. Средното молекулно тегло:

$$M_{cp} = \frac{M - M_c}{\Sigma n} = \frac{316 - 12}{10} = \frac{304}{10} = 30,4.$$

Топлината на взрива $Q = 1530$ kcal/kg. Тези данни позволяват по формули (2.26) да определим:

$$\varphi = N \sqrt{M_{cp} \cdot Q} = \frac{10}{316} \sqrt{30,4 \cdot 1530} = 6,8.$$

Тогава налягането и скоростта на детонация са следните:

$$P = F\varphi\rho_0^2 = 15,58 \cdot 6,8 \cdot 1,77^2 = 332 \text{ kbar};$$

$$D = A(1 + B\rho_0)\sqrt{\varphi} = 1,01(1 + 1,3.1,77)\sqrt{6,8} = 8,7 \text{ km/s.}$$

Скоростта на детонация на ТЕН, получена чрез измерване, е 8,3 km/s, което е добро съвпадение между теорията и практиката.

С това параметрите на взрива на фронта на детонационната вълна са определени, но интерес представлява и разпределението на ПВ зад фронта на детонационната вълна. Доказано е, че при плоска детонационна вълна налягането на продуктите на взрива зад фронта на вълната се изменя по степенен закон, а тяхната плътност – по линеен.

Много по-сложен е въпросът за определяне на параметрите на ПД при сферична или цилиндрична детонационна вълна. За сега това е осъществено с помощта на числени методи.

Разпространявайки се по заряда от експлозив фронтът на детонационната вълна достига до някаква преграда и я натоварва. Големината на това натоварване зависи не само от характеристиките на детонационната вълна, но и от свойствата на преградата и ъгъла на падане на вълната върху нея. Най-голямо ще бъде натоварването, когато преградата е абсолютно недеформируема, а детонационната вълна достига до нея по нормалата. Но тези въпроси не са предмет на настоящия курс.